

На правах рукописи

Федулов Артем Анатольевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ
С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ ПРОЦЕССА
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ
ПЛОСКИХ РЕБРИСТЫХ ЗАГОТОВОК**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель ПАРШИН ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: ЛЕХОВ ОЛЕГ СТЕПАНОВИЧ,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ
ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»,
заведующий кафедрой «Механика»

ПЕСИН ЮРИЙ ВОЛЬФОВИЧ,
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ
ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», доцент кафедры «Детали машин»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии
наук (ИМАШ УрО РАН)

Защита состоится 20 декабря 2013 г., в 14³⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина»
по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. М-323

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Автореферат разослан 18 ноября 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Е.Ю. Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На сегодняшний день оребренные поверхности применяются в различных агрегатах, машинах и приборах металлургической, машиностроительной, химической и пищевой отраслях промышленности, строительстве и энергетике. При этом в зависимости от их функционального назначения существует множество видов оребрения, разделяющихся по его геометрическим параметрам и конфигурации. Каждому виду оребрения предъявляются специфические требования по его технологичности и эксплуатационным характеристикам, что в дальнейшем играет ключевую роль при выборе способа нанесения оребрения на поверхность заготовки.

Тем не менее многие позиции оребренных изделий до сих пор не находят широкого применения в связи с низкой эффективностью технологий и оборудования для их получения. Таким образом, задача по совершенствованию технологий, оборудования и инструмента для получения заготовок с оребренной поверхностью является актуальной.

Целью работы является разработка процесса и определение параметров прокатки плоских ребристых заготовок на основе моделирования очага деформации.

Задачи исследования

1. Разработка математической модели процесса прокатки плоских заготовок с оребрением с получением данных по формоизменению и энергосиловым параметрам процесса.

2. Реализация в программном пакете алгоритма задания процесса прокатки ребристых заготовок с произвольной геометрией и при выбранных условиях протекания процесса.

3. Проведение анализа основных технологических параметров процесса прокатки заготовок с оребрением на основе результатов математического моделирования.

4. Разработка и подбор новых технологических и конструктивных решений, предлагаемых к внедрению на производстве с целью повышения экономической эффективности процесса оребрения плоских заготовок.

Научная новизна

1. Создание математической модели очага деформации нестационарного процесса оребрения поверхности плоских заготовок, учитывающей упрочнение материала при холодной деформации, накопленную неравномерность распределения физико-механических свойств металла при прокатке и различные виды граничных условий.

2. Получение зависимостей формоизменения металла и энергосиловых параметров при прокатке плоских ребристых заготовок от технологических параметров процесса и геометрии инструмента.

3. Получение зависимостей распределения крутящих моментов, действующих на рабочих валках прокатного стана, с целью установления их необходимых соотношений.

4. Определение условий, необходимых для реализации процесса прокатки плоских заготовок с оребрением в многовалковых клетях прокатных станов через опорные валки.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечена применением методов теории обработки металлов давлением и количественным согласованием результатов математического моделирования процесса прокатки с оребрением с экспериментальными данными, полученными в лабораторных условиях, а также приведенными в исследованиях других авторов.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Получены рекомендации для создания технологии и оборудования для прокатки плоских ребристых заготовок с любым видом оребрения поверхности.

2. Результаты исследований привели к созданию новой конструкции прокатного узла КВАРТО (патент РФ №2497615). Даны рекомендации по проектированию и изготовлению профилированных валков для нанесения оребрения с целью повышения стойкости инструмента и срока его службы.

3. Проведено сопоставление процесса прокатки в гладких валках с процессом прокатки заготовок с оребрением для аналогичных условий деформирования с целью оценки возможности использования существующего прокатного оборудования для прокатки плоских ребристых изделий.

4. Обобщенная методика решения задачи по определению параметров нестационарного процесса прокатки в программном комплексе DEFORM использована при подготовке и выпуске учебного пособия, успешно используемого при подготовке студентов и аспирантов УрФУ, обучающихся на технических специальностях.

5. Результаты исследований использованы при работах, выполненных в рамках грантов по программам УМНИК (2008, 2009 гг.) и СТАРТ (2011 г.).

Положения диссертационного исследования, выносимые на защиту

1. Математическая модель процесса прокатки плоских ребристых заготовок.

2. Алгоритм реализации математической модели процесса прокатки плоских заготовок с оребрением произвольной геометрии и при выбранных условиях протекания технологического процесса в программном комплексе DEFORM.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению формоизменения металла и энергосиловых параметров процесса в зависимости от режимов обжатий и геометрии профиля прокатного валка.

4. Рекомендации по выбору параметров технологии, оборудования и инструмента для получения плоских заготовок с оребрением.

5. Новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности процесса прокатки плоских ребристых заготовок.

Апробация работы

Основные результаты исследований опубликованы в ряде научно-технических изданий и обсуждались на конференциях различного уровня, в том числе, XV международной научной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2009 г.), XVI международной научной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2009 г.), международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ)» (Санкт-Петербург, 2009, 2011, 2013 гг.), V международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2011 г.), VIII научно-методической конференции «Новые образовательные технологии в вузе (НОТВ)» (Екатеринбург, 2011 г.)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 статей, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК; получен патент на изобретение; на основе материалов диссертации издано учебное пособие.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 153 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков, 2 таблицы, 40 формул, библиографический список из 106 наименований, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследования; определены его цели и задачи; показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ существующих способов производства оребренных изделий. В качестве изделий с оребренными поверхностями приводятся различные виды арматуры; листы с односторонним ромбическим и чечевичным оребрением; слесарный инструмент и его оснастка; фильтровальные сетки; элементы цилиндрических и реечных зубчатых передач, шлицевых прямобочных, треугольных и эвольвентных соединений; трубы теплообменников с наружным и внутренним оребрением (одно- и двухсторонним); микроканальные теплообменники и теплообменники с подповерхностными каналами. Кроме того операция нанесения оребрения может применяться при восстановлении изношенных деталей до номинальных размеров; для упрочнения поверхностей; нанесения покрытий и изготовлении биметаллических изделий.

Для получения оребрения могут использоваться различные способы металлообработки. Условно их можно отнести к двум группам: методы обработки металлов резанием и – обработки давлением. Также может иметь место комбинация обоих методов. Операции, осуществляемые методами резания, универсальны, позволяют получать широкий сортамент изделий различных размеров высокой точности, и менее трудоемки. Однако они также имеют и ряд недостатков, не позволяющих применять их в крупносерийном производстве. В частности, методы резания имеют низкую производительность, большой выход металла в стружку. Обработка металлов давлением, в отличие от резания, имеет следующие преимущества: экономия металла, увеличение производительности, улучшение механических свойств получаемых изделий, снижение затрат на инструмент, а также экономия на производственных площадях.

Требованиям высокой производительности и универсальности удовлетворяют два метода пластической деформации: накатывание профилированными роликами произвольной формы и прокатка в клетях с профилированными валками.

Разработанные в настоящее время технологические процессы, относящиеся к методам накатывания, осуществляются преимущественно по трем кинематическим схемам: методу копирования, методу образования ребер в матрице и методу огибания профиля. Рассмотрены специальные приспособления для накатки оребрения и возможность установки профилированных накатных роликов на существующих станках. Процесс накатки применяется для нанесения оребрения на плоские и криволинейные поверхности. Полученное изделие имеет более высокие механические характеристики, чем при оребрении поверхностей методами резания, однако данный способ обладает низкой производительностью. Кроме того ролики, применяемые при накатке, не отличаются достаточной стойкостью при получении оребрения большой высоты.

Наряду с обзором процессов накатки оребрения рассмотрены также различные способы получения оребрения методом прокатки: прокатка заготовки на штампе; прокатка изделий в клетях традиционной конструкции с профилированными валками; прокатка в специализированных зубопрокатных станах.

Прокатка изделий с оребрением в клетях традиционной конструкции является более производительным и менее энергоемким процессом, чем все остальные. Диапазон получаемых изделий достаточно широк. При этом изменение профиля и рисунка оребрения достигается заменой профилированных валков. Готовое изделие характеризуется высоким качеством при том, что прокатное оборудование имеет высокую надежность и долговечность.

Проведенный анализ существующих теоретических исследований процессов периодической и асимметричной видов прокатки показал, что их применение к процессу прокатки плоских заготовок с любым видом оребрения затруднено в связи отсутствием решений, являющихся универсальными и учитывающих широкий диапазон параметров процесса. Это вызывает необходимость постановки теоретической задачи определения формоизменения и энергосиловых параметров процесса прокатки плоских ребристых изделий, а также выдачи рекомендаций для ведения технологического процесса и по составу оборудования.

Во второй главе на основании проведенного обзора известных методов теоретического исследования для решения задачи по определению параметров технологического процесса прокатки плоских ребристых заготовок выбран метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в специализированном программном пакете.

Как известно, МКЭ основан на принципе дифференцирования. При этом МКЭ содержит следующие основные этапы решения задачи: постановка задачи; разбиение области решения на конечные элементы (КЭ); задание параметров полученной сетки КЭ; выбор уравнений для определения КЭ (в большинстве случаев наиболее удобным представляется использование полиномиальных функций); сведение уравнений в систему; численное решение данной системы; оценка точности решения и сопоставление результатов решения с критериями, установленными при постановке задачи.

Расчетная схема моделируемого процесса должна удовлетворять требованиям минимума входящих в нее объектов. При этом входящие объекты должны с достаточной точностью описывать реальные объекты, задействованные в данном процессе на производстве, или воспроизводить их действие на деформируемую заготовку. В случае моделирования процесса нанесения оребрения на плоскую заготовку в качестве исходной принимаем

схему прокатки полос в рабочих валках. Процесс рассматривается с момента задачи заготовки в валки до полного выхода оребренной полосы из клетки.

Моделирование проведено на основе рассмотрения процесса прокатки полосы с односторонним оребрением. В предлагаемой схеме очаг деформации ограничен двумя валками, верхним и нижним, которые зафиксированы в пространстве относительно своих осей. Верхний валок выполнен профилированным, нижний – гладким. Для оценки влияния формы профиля верхнего валка на формоизменение заготовки и энергосиловые параметры процесса использовано 3 вида профилирования валка: трапецеидальный, треугольный и полукруглый. Виды профиля оребрения представлены на рис. 1.

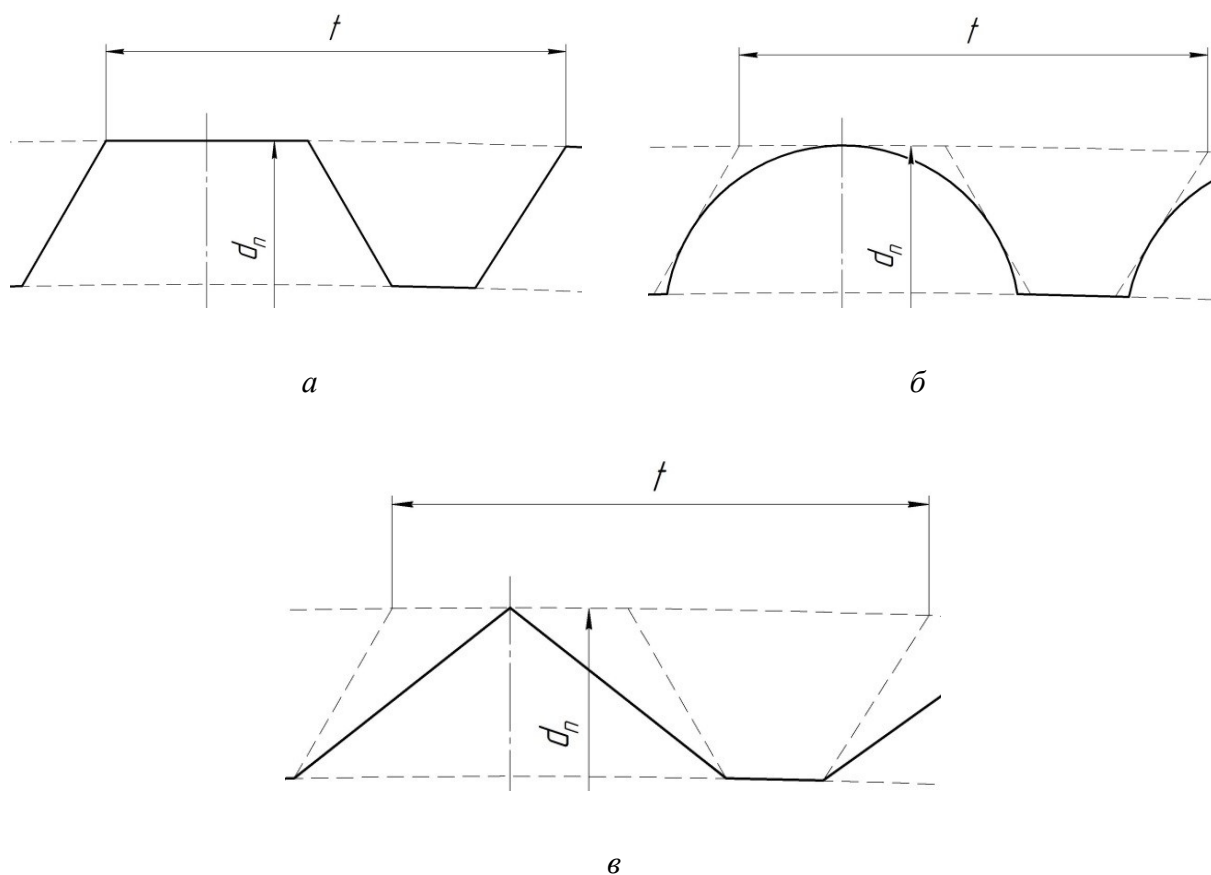


Рисунок 1 – Параметры оребрения профильного валка

(*a* – трапецеидальный; *б* – полукруглый; *в* – треугольный; *t* – шаг оребрения;
 d_n – наружный диаметр бочки рабочего профилированного валка)

Схема процесса нанесения одностороннего оребрения при прокатке полосы с учетом натяжения представлена на рис. 2.

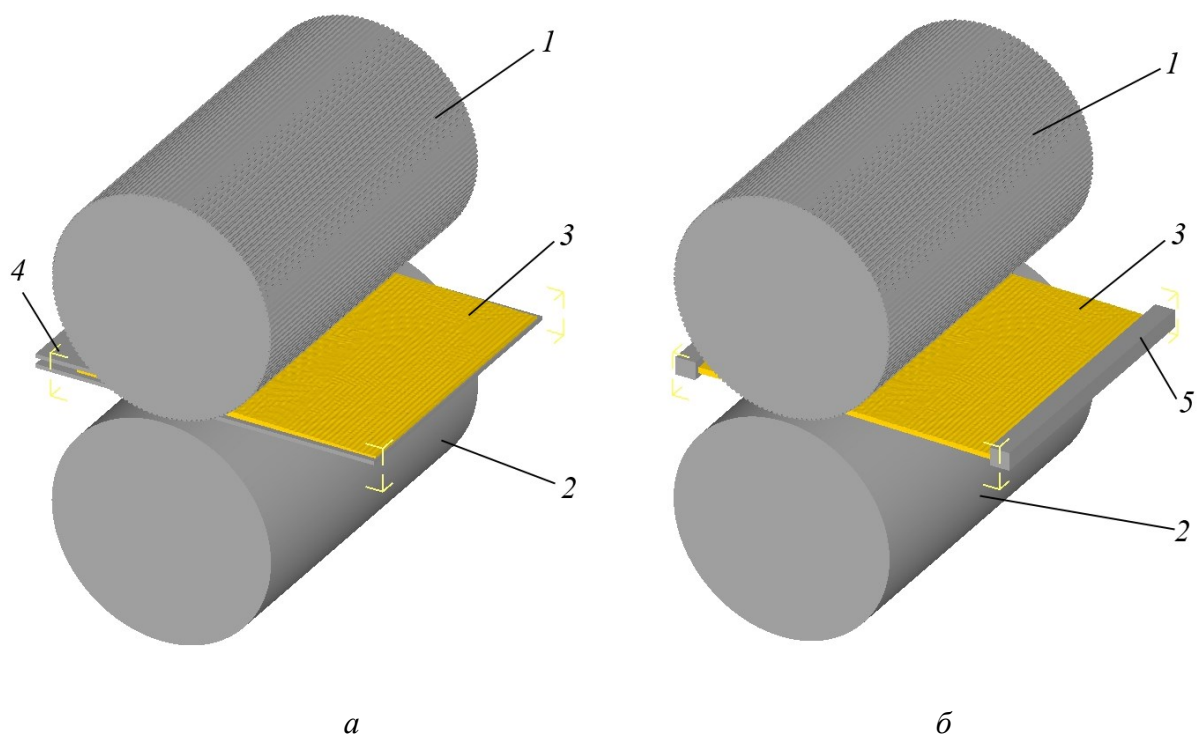


Рисунок 2 – Схема процесса оребрения полосы

(*а* – с проводковым инструментом; *б* – с инструментом для натяжения;

1 – верхний профилированный валок; *2* – нижний гладкий валок; *3* – заготовка;

4 – проводковый инструмент; *5* – инструмент натяжения)

В случае использования МКЭ для решения задачи по нахождению энергосиловых параметров и параметров формоизменения процесса прокатки плоских ребристых заготовок необходимо определить поле возможных скоростей, для которого одновременно будут выполняться принципы совместности и несжимаемости.

Поле допустимых скоростей при этом должно быть построено так, что в каждом элементе оно могло быть однозначно определено с помощью скоростей, связанных с определенными узловыми точками. В векторной форме множество скоростей в узловых точках определяется как

$$\mathbf{v}^T = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N\} \quad (1)$$

где T – индекс, обозначающий транспонирование;

N – произведение общего числа узлов на число степеней свободы, приходящихся на один узел.

Поле допустимых скоростей должно удовлетворять граничным условиям на поверхности S_u . В МКЭ интерполяция скалярной функции, значения которой определяются внутри элемента, представлена в следующем виде:

$$f(x, y, z) = \sum_i q_i(x, y, z) \cdot f_i \quad (2)$$

где f_i – значение функции в i -ом узле;

$q_i(x, y, z)$ – функция формы, в общем случае, полином от x , y и z .

Для реализации расчетной схемы на базе конечно-элементной формулировки с применением вариационных принципов используем основное уравнение вида:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \xi_{ij} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (3)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений;

F_i – усилия, действующие на поверхности;

V – объем области;

S – поверхность области;

S_F – поверхность, на которой действуют усилия;

δu_i – произвольная вариация допустимой скорости перемещения;

$\delta \xi_{ij}$ – вариация тензора скоростей деформаций в зависимости от δu_i .

Закон действия сил внешнего трения на поверхности контакта инструмента с металлом задаем как:

$$\tau = \psi \tau_s \quad (4)$$

где ψ – показатель трения по Зибелю;

τ_s – предел текучести материала при сдвиге.

Выражая матрицы жесткости для каждого элемента заготовки и суммируя их, получаем систему совместных линейных уравнений:

$$\mathbf{K} \Delta \mathbf{v} = \mathbf{f} \quad (5)$$

где \mathbf{K} – матрица жесткости;

$\Delta \mathbf{v}$ – величина изменения скорости в узлах;

\mathbf{f} – вектор силы узловых точек.

Для решения задачи используем итерационный метод Ньютона-Рафсона. В этом случае для нахождения решения принятая скорость \mathbf{v}_0 увеличивается до величины \mathbf{v}'_0 на каждом шаге расчета:

$$\mathbf{v}'_0 = \mathbf{v}_0 + \alpha \Delta \mathbf{v} \quad (6)$$

где α – коэффициент понижения; $\alpha \in (0; 1)$

Сходимость метода Ньютона-Рафсона обеспечивается тем, что величина принятой скорости \mathbf{v}_0 попадает в область допустимых значений, удовлетворяющих решению задачи.

Для повышения точности решения использовались сгущение сетки в приповерхностных областях прокатываемой заготовки и уменьшение шага расчета.

В третьей главе приводится цикл задания и численной реализации математической модели в программном комплексе DEFORM, который состоит из трех компонентов, отвечающих за задание исходных параметров, непосредственно решение и отображение результатов расчета.

Созданная математическая модель позволяет варьировать параметры профиля оребрения заготовок. При проведении параметрического анализа постоянными параметрами процесса оребрения являлись: толщина заготовки $H = 1,5$ мм; ширина заготовки $b = 70$ мм; наружный диаметр бочки профилированного вала $d_n = 55$ мм. Пластические свойства деформируемого металла задавались с помощью данных библиотеки материалов программного комплекса DEFORM-3D и кривой зависимости предела текучести от накопленной степени деформации для материалов сталь 20, сталь 08X18H10 и латунь Л68:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + g\Lambda^b \quad (7)$$

где σ_s – предел текучести материала;

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести;

Λ – накопленная степень деформации сдвига;

g и b – эмпирические коэффициенты, которые зависят от структуры деформируемого металла.

Параметрический анализ процесса прокатки заготовок с оребрением проведен на примере получения листов и полос с односторонним оребрением. В качестве переменных параметров принимались: величина обжатия заготовки $\varepsilon = 5 \dots 20\%$; дополнительно рассматривались случаи полного заполнения при обжатиях $\varepsilon = 20 \dots 25\%$; показатель трения по Зибелю $\psi = 0,1 \dots 0,8$; диаметр бочки гладкого вала $d_r = 53 \dots 56$ мм; профиль вала с шагом оребрения $t = 1,26$ мм (трапецеидальный, треугольный, полукруглый) (рис. 1); шаг профиля трапецеидального оребрения $t = 1,26 \dots 2,42$ мм; угол наклона трапецеидального профиля к оси прокатки $\alpha = 45 \dots 90^\circ$ (рис. 3); величина усилия натяжения полосы $T = 1 \dots 10$ кН. Величина шага профиля оребрения выбиралась из расчета, что ширина выступа по наружному диаметру вала $d_n = 55$ мм приблизительно равна ширине впадины по линии, соединяющей середины боковых граней впадины. Рассмотрен случай полного заполнения, при котором высота зуба профиля оребрения была уменьшена в два раза при сохранении наружного диаметра бочки вала. Для случаев, когда рассматривалось моделирование прокатки полосы в гладких валах, постоянными параметрами процесса являлись: толщина полосы $H = 1,5$ мм; ширина полосы $b = 70$ мм; наружный диаметр бочки вала $d_r = 55$ мм; показатель трения по Зибелю $\psi = 0,25$. Переменным параметром анализа прокатки являлась величина обжатия полосы $\varepsilon = 5 \dots 20\%$.

В результате параметрического анализа процесса прокатки листов и полос с односторонним оребрением произведена оценка формоизменения металла при прокатке, выявлены основные технологические параметры, влияющие на значение высоты оребрения заготовки, такие как величина обжатия, показатель трения при прокатке, величина шага оребрения профиля рабочего вала, форма профиля оребрения, величина натяжения полосы, угол наклона профиля к оси прокатки. Выявлено, что к увеличению высоты оребрения ведут повышение

величины обжатия полосы, увеличение значения показателя трения и шага профиля, снижение величины натяжения полосы при прокатке, увеличение угла наклона профиля оребрения к оси прокатки и форма профиля оребрения с минимальной протяженностью зоны контакта профильного валка с металлом.

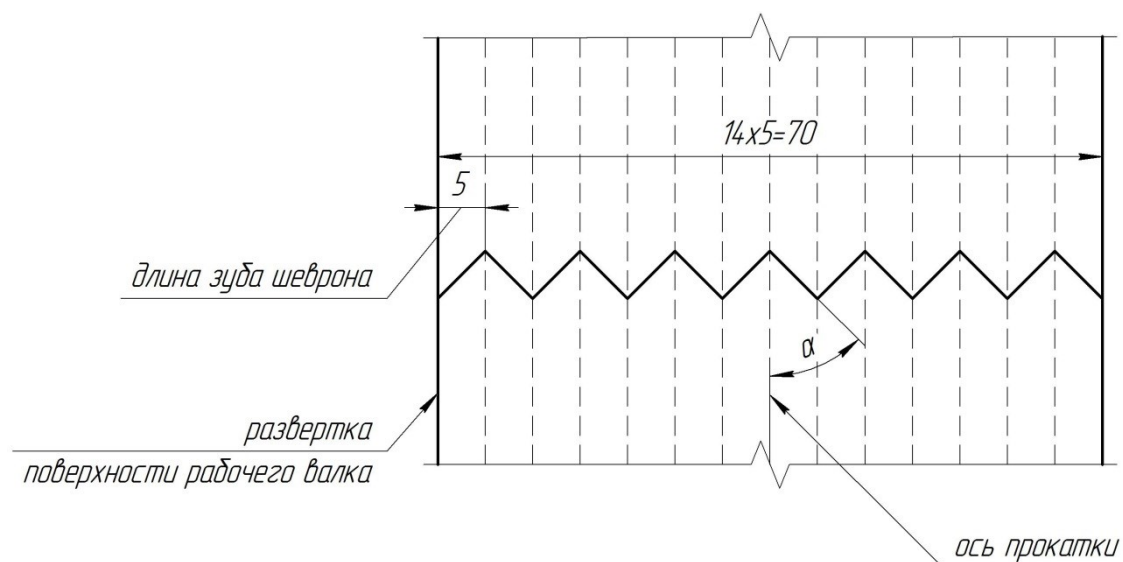


Рисунок 3 – Профиль оребрения с наклоном ребер
относительно оси прокатки

(α – угол наклона готового профиля к оси прокатки)

Исследование энергосиловых параметров процесса прокатки плоских оребренных заготовок позволило определить влияние технологических параметров и геометрии инструмента на величину усилия и момента прокатки, а также распределение крутящего момента между рабочими валками прокатного стана для различного вида граничных условий.

При этом установлено, что минимальные значения энергосиловых параметров достигаются при снижении значений относительного обжатия, показателя трения, величины натяжения концов полосы при прокатке, а также при уменьшении зоны контакта профильного валка с металлом при прокатке оребренной полосы.

При проведении параметрического анализа рассмотрено также влияние размеров прокатных валков на значения параметров формоизменения и энергосиловые параметры процесса прокатки для разных соотношений диаметров бочек гладкого и профилированного валков. Совпадение значений крутящих моментов на рабочих валках стана при $d_n = 55$ мм и $d_r = 54$ мм в случае прокатки полосы с односторонним поперечным трапецеидальным оребрением получено при $\varepsilon = 19,4\%$.

Рассмотрены случаи полного заполнения металлом профиля инструмента с определением условий полного заполнения профиля инструмента металлом полосы и нахождением энергосиловых параметров процесса.

Проведено сравнение процесса прокатки полос с односторонним поперечным трапецеидальным оребрением и процесса прокатки полос в гладких валках ($d_r = 55$ мм) с целью возможности реализации процесса на станах традиционной конструкции. При обжати $\varepsilon = 20\%$ значение усилия при гладкой прокатке полосы больше на $11,4\%$ значения усилия при прокатке полос с трапецеидальным профилем; значение момента прокатки при прокатке на гладкой бочке больше на $17,0\%$ значения, полученного при прокатке с трапецеидальным профилем.

Параметрический анализ созданной модели процесса прокатки плоских оребренных заготовок позволяет определить основные параметры динамики процесса оребрения.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса прокатки плоских заготовок с оребрением и внедрения результатов исследований.

Целью экспериментальных исследований являлась проверка адекватности созданной математической модели. Для проведения экспериментального исследования была использована оребренная холоднокатаная полоса из материала сталь 10кп, прокатанная с обжатием $17,9\%$.

При проведении экспериментальных исследований использовался метод Г.Д. Деля, в соответствии с которым производились замеры микротвердости в точках с одинаковым расположением относительно профиля оребрения (рис. 4).

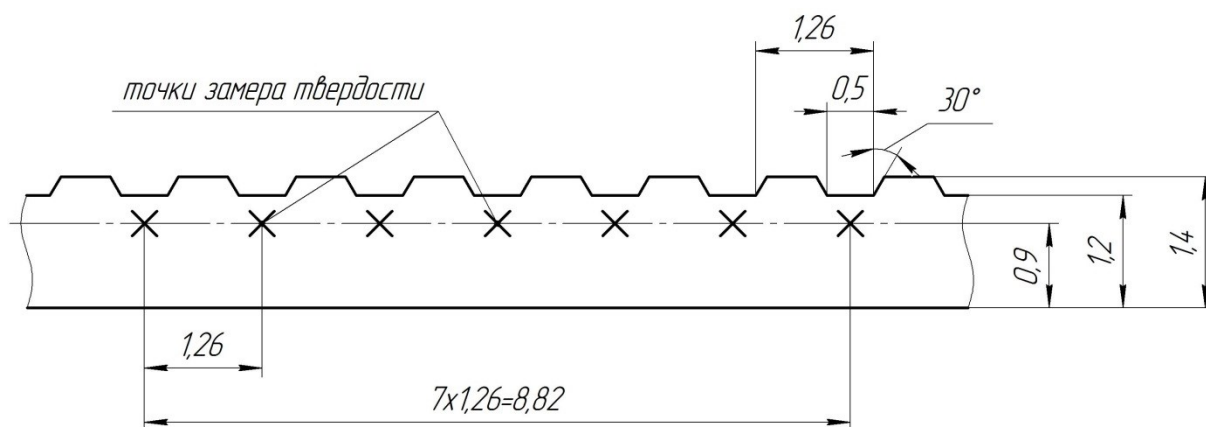


Рисунок 4 – Образец полосы с односторонним поперечным оребрением

Для определения предела текучести использовались выражения, полученные для углеродистых и низколегированных сталей. При значениях твердости $HV > 1500$ МПа:

$$\sigma_s = 0,367HV - 240, \text{ МПа} \quad (8)$$

Значение предела текучести по результатам численного моделирования вычислялось с помощью эмпирических коэффициентов при известном значении накопленной степени деформации Λ для стали 10кп:

$$\sigma_s = 270 + 318,3 \cdot \Lambda^{0,646}, \text{ МПа} \quad (9)$$

Полученные в результате эксперимента данные по значению предела текучести σ_s сравнивались с результатом теоретического исследования процесса прокатки полос с односторонним оребрением. Рассчитанное отклонение по величинам пределов текучести, полученным теоретическим и экспериментальным путем в процессе одностороннего оребрения, составляет не более 4,2%, что говорит об адекватности созданной математической модели реальному процессу формоизменения при прокатке полос с односторонним оребрением.

Проведено сопоставление данных параметрического анализа с результатами экспериментальных исследований, приведенных в литературных

источниках. В качестве сравнения выбраны экспериментальные работы, выполненные с целью определения формоизменения и энергосиловых параметров процесса прокатки полос с односторонним поперечным оребрением на лабораторном стане КВАРТО 55х260х220.

Результаты исследований по определению значений высоты оребрения, усилий и моментов прокатки от величины относительного обжатия, построенные на основе параметрического анализа, приведенного в настоящей работе, попадают в доверительный интервал распределения экспериментальных величин, полученных на стане КВАРТО 55х260х220 во всем диапазоне относительных обжатий.

Итогом выполненных в работе исследований явились рекомендации по ведению процесса прокатки плоских заготовок с оребрением в клетях традиционной конструкции. Выполнен анализ и даны рекомендации по использованию различных вариантов технологического процесса и состава оборудования. Представлен обзор способов повышения прочности и стойкости прокатного инструмента за счет выбора рационального способа их изготовления.

В работе предложен также способ регулирования геометрических параметров оребренной полосы и состояния ее поверхности, основанный на бесконтактных лазерных средствах измерения толщин и дефектов при прокатке плоских заготовок.

Разработана конструкция валкового узла рабочей клетки прокатного стана с приводом на опорные валки, позволяющая в значительной мере упростить замену изношенного инструмента за счет быстрого извлечения изношенного прокатного вала и установки нового.

Для условий процесса прокатки листов и полос с оребрением предложена схема привода стана через опорные валки. Для данной схемы привода должно выполняться условие:

$$f \geq f_{\min} = \frac{1}{P} \left[\frac{2(M_B + M_{\text{дин}})}{d_B} - \Delta T_B \right] \quad (10)$$

где f – коэффициент трения между рабочим и опорным валками;

f_{\min} – минимальное значение коэффициент трения между рабочим и опорным валками, при котором возможно осуществление процесса прокатки;

d_b – катающий диаметр бочки ведущего валка;

P – значение усилия прокатки;

ΔT_b – разность натяжений концов полосы, приходящаяся на ведущий валок;

M_b – значение крутящего момента на ведущем рабочем валке;

$M_{\text{дин}}$ – динамический момент, необходимый для вращения ведущего рабочего валка.

Также предложена схема, в которой привод целиком осуществляется за счет разности переднего и заднего натяжений (способ «прокатки волочением»). Для этого случая приведено выражение для коэффициента натяжения переднего конца полосы:

$$k_1 = \frac{1}{h_k \cdot \sigma_{s1}} \left[\frac{4(M + M_{\text{дин}})}{b \cdot (d_n + d_r)} + k_0 \cdot h_0 \cdot \sigma_{s0} \right] \quad (11)$$

где M – значение момента прокатки;

$M_{\text{дин}}$ – динамический момент на рабочих и опорных валках, возникающий при разгоне и приведенный к осям рабочих валков;

d_n – катающий диаметр бочки рабочего профилированного валка;

d_r – катающий диаметр бочки рабочего гладкого валка;

b – ширина полосы;

h_k – толщина полосы по линии впадин;

σ_{s1} – предел текучести материала полосы после прокатки;

h_0 – исходная толщина полосы;

k_0 – коэффициент заднего натяжения полосы при прокатке;

σ_{s0} – предел текучести материала полосы до деформирования.

Значения коэффициента переднего натяжения полосы при этом должны находиться в диапазоне практически применяемых величин.

Результаты выполненных работ приняты к рассмотрению на ОАО «Первоуральский новотрубный завод» (ОАО «ПНТЗ») и ОАО «Уральский

завод тяжелого машиностроения» (ОАО «УЗТМ»). Данные, полученные в результате исследований, послужили основой работ в рамках грантов по программе УМНИК по темам «Разработка технологии и оборудования для производства профилей переменного сечения на основе исследования механики очага деформации» (2008) и «Разработка технологии, оборудования и инструмента для производства профилей с поперечным оребрением на основе исследования механики очага деформации» (2009) и гранта по программе СТАРТ по теме «Разработка и внедрение высокоэффективных технологий, оборудования и инструмента для получения изделий с заданными потребительскими свойствами на основе использования нестационарных процессов обработки металлов давлением» (2011). Методика решения задачи по определению параметров нестационарного процесса прокатки в программном комплексе DEFORM использована при создании учебного пособия «Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D», рекомендованного для ведения образовательного процесса в УрФУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ известных способов производства изделий с оребрением выявил, что наиболее рациональным является способ производства изделий с оребрением, например, листов и полос, в прокатных клетях с профилированными валками.

2. С использованием МКЭ разработана математическая модель процесса прокатки плоских заготовок с оребрением, учитывающая неравномерное распределение физико-механических свойств металла в очаге деформации, а также различные виды граничных условий.

3. Разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, позволяющий исследовать энергосиловые параметры процесса, определять формоизменение заготовки в любой момент времени, характер распределения напряжений и перемещений металла с целью совершенствования технологического процесса и оборудования для прокатки

плоских ребристых заготовок.

4. Экспериментальные исследования по определению предела текучести металла полосы, проведенные автором, а также сравнение с данными исследований по определению формоизменения и энергосиловых параметров, выполненных другими авторами, при прокатке полос с односторонним поперечным оребрением позволяют сделать вывод об адекватности разработанной математической модели.

5. Проведенные работы позволили предложить новые технические решения по регулированию геометрических параметров оребренной полосы и состояния ее поверхности, а также по конструкции валкового узла рабочей клетки прокатного стана с приводом на опорные валки, направленные на повышение эффективности производства.

6. Полученные аналитические выражения для минимально возможного значения коэффициента трения между рабочим и опорным валками, при котором происходит процесс прокатки, и для коэффициента натяжения переднего конца полосы позволяют определить условия для реализации привода рабочих валков прокатного стана через опорные валки и повысить эффективность процесса прокатки полосовых заготовок.

7. Результаты работ использованы в рамках грантов по программам УМНИК (2008, 2009 гг.) и СТАРТ (2011 г.).

8. Методика решения задачи по определению параметров нестационарного процесса прокатки в программном комплексе DEFORM опубликована в учебном пособии, используемом для обучения студентов и аспирантов УрФУ.

9. Результаты работ переданы для внедрения на ОАО «ПНТЗ» и ОАО «УЗТМ».

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Карамышев А. П. Исследование нестационарных процессов обработки металлов давлением / А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, В. С. Паршин, А. И.

Пугин, А. А. Федулов // *Металлург.* – 2009 – №10. – С.52-54.

2. Некрасов И. И. Исследование процесса прокатки оребренных полос с применением программного комплекса DEFORM / И. И. Некрасов, В. С. Паршин, А. П. Карамышев, А. А. Федулов // *Металлург.* – 2011 – №3. – С. 40-42.

3. Карамышев А. П. Моделирование процессов обработки металлов давлением в DEFORM-3D с целью рационального построения технологических процессов / А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, В. С. Паршин, А. И. Пугин, А. А. Федулов // *Металлург.* – 2012 – №2. – С.53-55.

Основные результаты также опубликованы в работах:

4. Карамышев А. П. Математическое моделирование процессов нестационарного пластического течения в программном комплексе DEFORM / А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, В. С. Паршин, А. И. Пугин, А. А. Федулов // *Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2009): Труды международной научно-технической конференции.* – Санкт-Петербург: Издание Политехнического университета. – 2009. – С. 97-98.

5. Федулов А. А. Трубы с оребрением для теплообменных агрегатов / А. А. Федулов, И. И. Некрасов, В. С. Паршин // *Научные труды XV международной научной конференции молодых ученых: сборник статей.* В 3 ч. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, Ч.2. – 2009. – С. 240.

6. Федулов А. А. Исследования процесса прокатки листов и полос с оребрением / А. А. Федулов, И. И. Некрасов, В. С. Паршин // *Научные труды XVI международной научной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей.* В 3 ч. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, Ч.2. – 2009. – С. 384-385.

7. Федулов А. А. Исследование процесса прокатки полос с различной формой поперечного оребрения / А. А. Федулов, И. И. Некрасов, В. С. Паршин // *Современные проблемы машиностроения Труды V международной научно-технической конференции.* – Томск: НИ ТПУ. – 2010. – С. 136-138.

8. Карамышев А. П. Использование программного комплекса DEFORM-3D для теоретических исследований процессов обработки металлов давлением / А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, В. С. Паршин, А. И. Пугин, А. А. Федулов // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2011): Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Издание Политехнического университета. – 2011. – С. 36-38.

9. Карамышев А. П. Моделирование процессов обработки металлов давлением с помощью программного комплекса DEFORM-3D / А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, В. С. Паршин, А. И. Пугин, А. А. Федулов // Новые образовательные технологии в вузе: сборник материалов восьмой научно-методической конференции. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ». – 2011. – С. 455-461.

10. Некрасов И. И. Исследование нагруженности элементов главной линии прокатного стана при ассиметричной прокатке полос / И. И. Некрасов, А. П. Карамышев, В. С. Паршин, А. А. Федулов // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2013): Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Издание Политехнического университета. – 2013. – С. 374-376.

11. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие / В. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, А. И. Пугин, А. А. Федулов. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

12. Пат. 2497615 Российская Федерация, МПК В21В 31/02. Опорный узел рабочих валков прокатной клетки КВАРТО / Паршин С. В., Федулов А. А., Карамышев А. П., Некрасов И. И., Пугин А. И., заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ООО «НТП «РадиалПро». – №2011144035/02. заявл. 31.10.2011, опубл. 10.11.2013, Бюл. №31. – 7 с.: ил.